



**Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Educação a Distância da UFSM – EAD
Universidade Aberta do Brasil – UAB**

**Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos
Processos Produtivos**

Polo: Panambi

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE GERAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO NA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SERRARIA, EM PORTO
ALEGRE (RS)**

GARCIA, Ian Gabriel Brum¹

HOFFMANN, Ronaldo²

MAYER, Flávio Dias³

RESUMO

Este artigo apresenta a análise de dados coletados referentes às características do esgoto afluente da Estação de Tratamento de Esgoto Serraria, no município de Porto Alegre, Brasil, voltados para o estudo de caso do aproveitamento do biogás para produção de energia elétrica. A planta da Estação processa o esgoto em tratamento de nível terciário, com etapa de digestão anaeróbica pelo sistema de

¹ Engenheiro Eletricista. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

² Dr. Eng. Químico. Professor Orientador. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

³ Dr. Eng. Químico. Coorientador. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo (Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASBs) durante a etapa secundária. Atualmente, o biogás é queimado e o lodo gerado é depositado em aterro sanitário. A energia elétrica consumida é totalmente fornecida pela rede de distribuição. Com o estudo de caso verificou-se a viabilidade técnica e econômica para a geração de energia elétrica a partir do biogás efluente, para utilização na própria Estação, em atendimento a maioria das cargas. A tecnologia de conversão energética empregada foi a de motor de combustão interna de ciclo Otto, com seus respectivos equipamentos acessórios. Os custos de instalação, operação e manutenção, para cinco anos, foram orçados em R\$ 4.437.989,28. O retorno sobre o capital investido ocorre em 4 anos e 7 meses. Há a tendência de aumento da tarifa de energia elétrica da rede e da vazão de entrada nos UASBs, tornando a autogeração ainda mais viável.

Palavras-chave: biogás de esgoto, tratamento de esgoto, energia elétrica.

ABSTRACT:

This paper presents the analysis of data collected relating to the affluent sewage characteristics of the Sewage Treatment Plant Serraria, in Porto Alegre, Brazil, focused on the case study of biogas exploitation generated to produce electricity. The station plant processes the sewage in a tertiary treatment with anaerobic digestion step by Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASBs. Nowadays, biogas is burned and the sludge generated deposited in landfill. The consumed electricity is fully provided by the distribution network. With the case study verified the technical and economic feasibility for the generation of electricity from biogas effluent for use in the own station, in attendance to most loads. The main energy conversion technology was the internal combustion engine Otto cycle, with their accessories. Installation costs, operation and maintenance for five years are estimated at R \$ 4,437,989.28. The return on invested capital occurs in 4 years and 7 months. There is a tendency of increase of electricity from the network tariff and the input flow in UASBs, become the self-generation even more viable.

Keywords: sewage biogas, sewage treatment, electricity.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm sido acentuadas e aceleradas nas últimas décadas, pelo crescente uso dos recursos naturais, em especial pelo consumo dos combustíveis de origem fóssil. Conforme Rovera e Pereira (2001) as alterações no clima representam “um grave problema ambiental, causado pela intensificação do efeito estufa”. Este fenômeno está diretamente relacionado ao aumento na concentração de gases estufa, com propriedades de aumentar a retenção da radiação infravermelha irradiada pelo sol. O efeito estufa ocorre naturalmente e é essencial para a manutenção dos climas e da temperatura média do planeta Terra, permitindo a vida vegetal e animal. É caracterizado pelo aprisionamento de energia térmica na baixa atmosfera, aumentando a temperatura média em microclimas, essencialmente urbanos. Dentre as atividades humanas que mais interferem para as causas do efeito estufa estão as decorrentes da geração elétrica, transportes, processos industriais, e também aquelas provenientes do ciclo natural da matéria orgânica.

Embora estejam em ciclos fechados, o processo de transformação da matéria orgânica pode agravar o efeito estufa, conforme a composição dos gases gerados. O metano (CH_4) é produzido durante a decomposição anaeróbica, proveniente principalmente da atividade agrícola, pecuária, gás natural fóssil, aterros sanitários e esgotos, sendo um dos principais gases causadores do efeito estufa (CHERNICHARO, 2007).

Uma das formas de reduzir o impacto ambiental das emissões do metano para a atmosfera é queimando-o. A combustão converte o metano em dióxido de carbono (CO_2) – um gás inerte - e energia térmica. Esta alternativa é utilizada usualmente em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), onde ocorre produção de biogás, formado majoritariamente por CH_4 e CO_2 . A energia térmica é frequentemente perdida para o ambiente, sem aproveitamento para sua conversão em energia elétrica.

O biogás, visto como insumo, e não como rejeito, muda o paradigma das ETEs, de consumidoras de energia e poluidoras do ambiente para uma importante auxiliar no processo de melhorar a relação do ser humano com a natureza e o desenvolvimento sustentável. Sendo este um dos principais objetivos a serem alcançados com medidas de redução de emissões dos gases estufa, o profissional

de Eficiência Energética está capacitado a agregar métodos para empregar de forma eficiente os recursos naturais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As mudanças climáticas têm sido constante tema de discussão nos encontros internacionais dos representantes dos países desenvolvidos e emergentes. Há um aumento notável na intensidade das intempéries no mundo inteiro, bem como na frequência destes fenômenos. Também percebe-se o deslocamento de zonas tipicamente atingidas por fortes vendavais e tornados, para outras que não eram costumeiramente abrangidas por temporais. Nas regiões polares e de grandes altitudes percebe-se o derretimento de calotas polares e geleiras consideradas perpétuas (IPCC, 2007).

Nas últimas duas décadas houve um aumento na temperatura média da Terra de cerca de 0,85°C. Estima-se que até o ano 2100 este aumento chegue a 4°C caso nenhuma medida seja tomada. As consequências deste aumento provocarão inundações, grandes secas, aumento do nível do mar e extinção de muitas espécies, além de deslocamento de populações de pessoas e animais. (IPCC, 2007). O protocolo de Kyoto representa o conjunto de iniciativas da comunidade internacional em atingir o objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), que refere-se a estabilizar para níveis seguros as concentrações de gases de efeito estufa. Estas iniciativas representam alto custo para os países integrantes do Anexo I (grupo de trinta e seis países industrializados e de economias em transição, do qual o Brasil não faz parte). Foram elaborados mecanismos de flexibilidade para o atingimento dessa meta, como: Comércio de emissões e Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (LEMOS, 2001).

Este comportamento do clima tem sido acompanhado pela mudança na concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera que, por sua vez, segue a tendência do processo de industrialização da civilização humana. A Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization*) anunciou em 2013 que as concentrações de dióxido de carbono aumentaram 142% em comparação ao que

era na época pré-industrial (1750), as de óxido nitroso subiram 121% e a de metano 253%. As Figuras 1 e 2 permitem observar-se claramente o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, em partículas por milhão. A Figura 1 mostra a linha do tempo dos últimos oitocentos mil anos. A Figura 2, foca os últimos trezentos anos, onde desenvolveu-se a atividade industrial com forte interferência humana na emissão do dióxido de carbono.

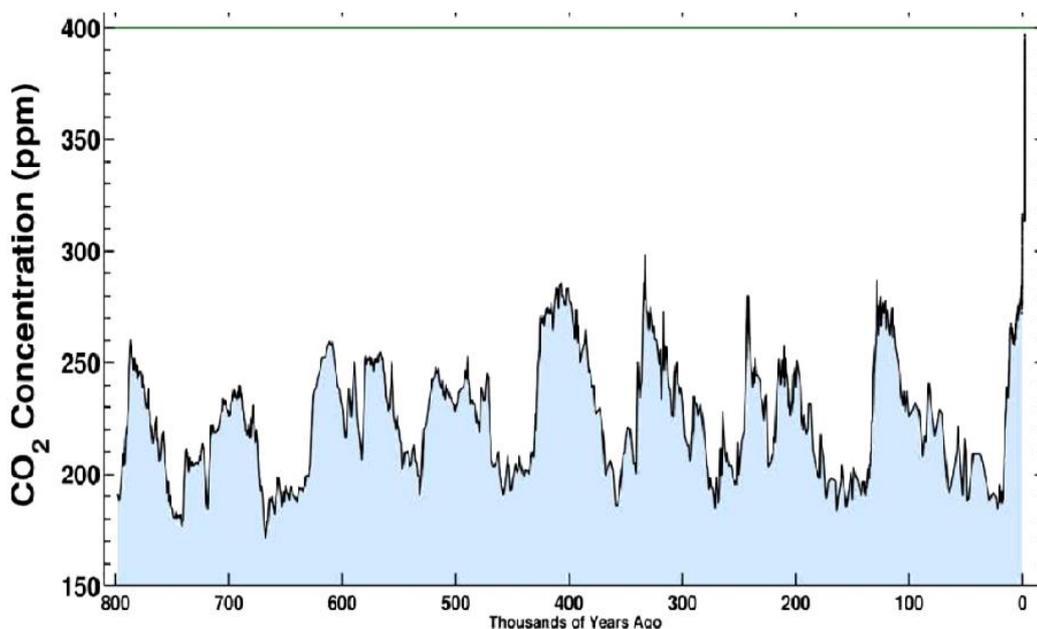


Figura 1 - Evolução da concentração de CO₂ em 800 mil anos - Fonte: NOAA. Disponível em: <www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.

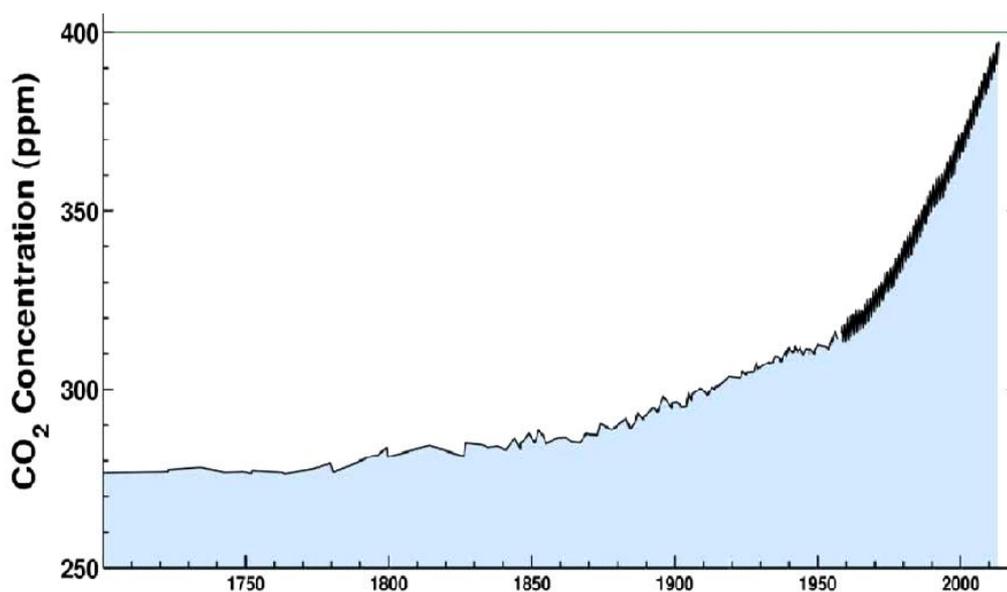


Figura 2 - Evolução da concentração de CO₂ nos últimos 300 anos - Fonte: NOAA. Disponível em: <www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.

2.1 Biogás

A mistura de gases resultante do processo de decomposição da matéria orgânica, durante a etapa de digestão anaeróbica, isto é, sem a presença de oxigênio, é chamado biogás. Está contido na biomassa, que representa a parcela orgânica sólida dos dejetos rurais da agricultura e pecuária, urbanos industriais, comerciais e residenciais, na forma de lixo e esgotos. No caso dos esgotos o biogás está contido na mistura líquida com sólidos dissolvidos, que é representado pela parte sólida do tratamento, retiradas a areia, espuma e sólidos grosseiros.

Esta matéria é convertida do estado sólido para gasoso, pela ação das bactérias metanogênicas, neste estudo de caso, as *Archaeobacterias*. O biogás se forma, basicamente, em três etapas: a fermentação, a acetogênese e a metanogênese, conforme mostra a Figura 3, onde o processo de digestão anaeróbica é detalhado.

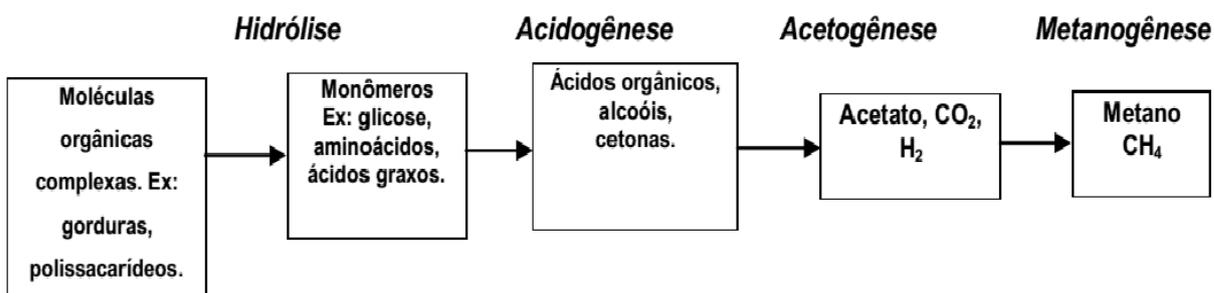


Figura 3 - Processo de digestão anaeróbica - Fonte: Bitton, 2005.

Dentre os fatores que influenciam na eficiência da produção do biogás os mais relevantes são detalhados abaixo (CHERNICHARO, 2007):

a) Substrato: as substâncias orgânicas como os carboidratos, lipídeos e proteínas são mais facilmente biodegradáveis que a celulose, lignina e compostos artificiais.

b) Nutrientes: o nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e cobalamina (vitamina B12) são os principais nutrientes para as populações microbianas, nesta ordem.

c) Temperatura: a faixa de temperatura entre 32°C e 37°C é ideal para a produção enzimática das bactérias formadoras de metano, neste estudo de caso. A temperatura inferior a 10°C e superior a 65°C matam as bactérias.

d) pH: a faixa de pH ótima para o crescimento das bactérias metanogênicas está entre 6,5 e 7,5.

e) Alcalinidade: há uma diminuição do pH a medida que as bactérias produzem ácidos e dióxido de carbono.

f) Acidez: está relacionada com o pH e a alcalinidade. O pH pode reduzir rapidamente caso haja alta produção de ácidos voláteis.

g) Ambiente do reator: o meio deve ser isolado do oxigênio do ar, pois as bactérias que produzem metano são anaeróbias. Se houver contaminação do reator com oxigênio (vazamentos que permitam a entrada de ar) a decomposição da matéria orgânica produzirá apenas dióxido de carbono.

h) Produção e consumo de ácidos orgânicos: o pH está relacionado à produção de ácidos graxos e a degradação em metano. A alcalinidade do meio exerce o “efeito tampão”, impedindo a queda do pH, porém os ácidos voláteis neutralizam este efeito, ocorrendo a diminuição do pH.

A composição do biogás é, na ordem decrescente, formada pelos gases metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e gás sulfídrico (H_2S). A proporção de cada gás na composição do biogás depende de parâmetros como o substrato e o ambiente digester (LA FARGE, 1979 Apud COLDEBELLA, 2006).

Seja em decorrência de processos naturais ou provocados pelo homem, através da conversão de energia ou reações químicas, os gases do biogás atingem a atmosfera contribuindo para o efeito estufa em um grau que varia conforme a constituição de sua mistura. Segundo o IPCC (1996), tendo como base o dióxido de carbono, o metano, que é o de maior concentração na composição do biogás, é cerca de vinte e uma vezes mais danoso ao efeito estufa em um intervalo de cem anos e cinquenta e seis vezes mais potencialmente negativo considerando um intervalo de vinte anos.

2.2 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs)

A água residual da utilização humana é conceituada como esgoto. Sua origem pode ser industrial, comercial ou residencial (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994). A água pluvial (das chuvas) possui rede apropriada, embora haja uma considerável quantidade de ligações destas às redes de esgotamento doméstico, de

forma clandestina.

A composição do esgoto doméstico é produto dos resíduos da preparação de alimentos, asseio pessoal, lavagem de roupas e utensílios domésticos e necessidades fisiológicas. Comumente são encontrados nos esgotos contaminantes líquidos e sólidos, tais como absorventes, preservativos, trapos, pedaços de madeira, papéis de bala, “cotonetes”, tampas de garrafa, cabelos, fio dental, cigarros, óleo de cozinha e tintas, os quais deveriam ser dispostos junto ao lixo doméstico (PEREIRA, 2004).

Conforme Chernicharo (2007), O esgoto sanitário contém uma fração de 99,9% de água para 0,1% de material sólido dissolvido. De acordo com Alves (2008) os resíduos líquidos com matéria orgânica são típicos de uma população, com características e concentrações próprias. É nesta pequena proporção de uma para mil, onde estão contidos sólidos suspensos e dissolvidos, orgânicos e inorgânicos, um conjunto de inúmeros agentes patológicos como vírus e bactérias. Sem receber o devido tratamento, esta água quando lançada em rios, córregos e mares causa danos de saúde pública por meio da transmissão de doenças, além de auxiliar a proliferação de certas algas e contaminando animais e vegetais.

Conceitua-se Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) como o sistema capaz de tratar águas residuais de origem domésticas e/ou industriais, para que posteriormente o efluente possa ser escoado com impactos ambientais e sanitários a níveis aceitáveis, de acordo com a legislação vigente, utilizando processos físicos, químicos e biológicos. A Figura 4 ilustra o fluxograma de uma ETE, que servirá como referência neste estudo. O afluente representa o(s) canal(is) de entrada do esgoto, onde está(ão) a(s) captação(ões). Durante o processo de tratamento há a separação da parte sólida dissolvida na água, resultando em efluentes de três tipos: gasosos, líquidos e sólidos úmidos (lodo). O canal de saída do esgoto tratado na forma líquida é chamado emissário e comumente está sobre rios e lagos, dos quais, em alguns casos, a água para o abastecimento da população é captada. A seta grande, que vai diretamente do afluente para o efluente representa a parcela não tratada das águas residuais, as quais são lançadas diretamente para o ambiente com alta carga de poluentes.

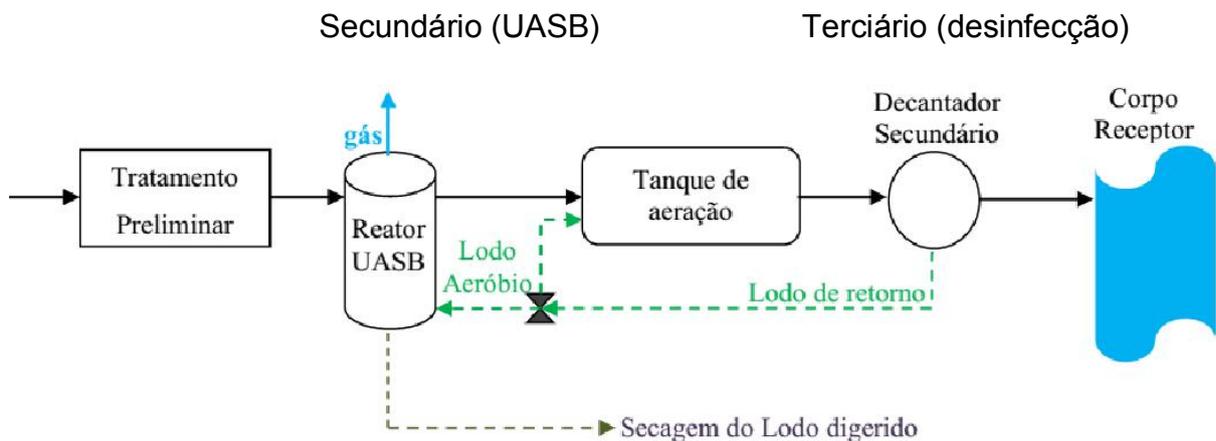


Figura 4 - Fluxograma do tratamento de esgoto - Fonte: Perovano e Formigoni, 2011.

O tratamento preliminar é responsável pela separação dos sólidos grosseiros, espuma, gordura e areia. A ETE pode ser composta por um sistema de gradeamento grosseiro e outro fino, peneiras mecanizadas rotativas, desarenamento em caixas de areia e desengorduramento em caixas de gordura (FUNASA, 2004).

Apesar da separação de todo material visivelmente poluidor do esgoto, suas características químicas e biológicas permanecem as mesmas. O tratamento primário visa separar a água pela ação física de sedimentação, auxiliado por agentes químicos coagulantes, floculando a matéria poluente (ZILOTTI, 2012).

Na sequência do tratamento do esgoto livre de materiais grosseiros, há a decantação dos sólidos que sedimentam no fundo do tanque. Para auxiliar neste processo são utilizados coagulantes, como o sulfato de alumínio. Esta substância forma flocos com as partículas sólidas que precipitam no decantador. Para este material utiliza-se a expressão “lodo” (ZILOTTI, 2012).

O tratamento secundário é um processo biológico, que pode ser do tipo lodos ativados ou filtro biológico, utilizando reatores onde a matéria orgânica será consumida por microrganismos anaeróbicos (com ausência de oxigênio) e aeróbicos (na presença de oxigenação forçada). A eficiência do tratamento biológico é alta: a redução da matéria orgânica dissolvida na água chega a 95%. Posteriormente os microrganismos passam por um processo de sedimentação nos decantadores secundários (SEMAE, 2011).

O tratamento terciário corresponde à desinfecção das águas, sendo

removidos organismos patogênicos ou nutrientes que potencializam a eutrofização das águas receptoras de rios e mares. Normalmente, remove-se nitrogênio e fósforo para evitar o crescimento de algas cianofíceas, as quais diminuem a quantidade de oxigênio dissolvido na água, que acabam por asfixiar peixes (CENBIO, 2004).

2.3 Recuperação do biogás em ETEs

A digestão anaeróbica da matéria orgânica ocorre em um ambiente chamado biodigestor. É um reator de reações químicas biológicas. Este processo é delicado e depende de fases independentes, influenciadas por fatores sensíveis, como: temperatura, pH, nutrientes e inibidores. A Figura 5 ilustra o fluxo do esgoto pela estação de tratamento, detalhando os efluentes do processo de digestão anaeróbica.

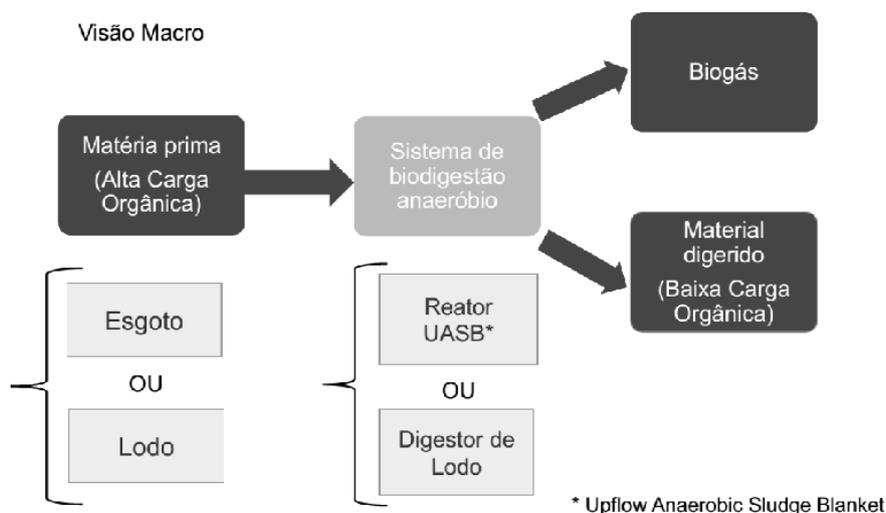


Figura 5 – Fluxograma de uma ETE com foco na digestão anaeróbica -
Fonte: Moreira, 2014.

Existem biodigestores de dois tipos: de produção contínua e descontínua. No primeiro, após cerca de noventa dias, o biodigestor é aberto para limpeza e recarga de um novo ciclo de produção de biogás. Durante este período a biomassa é fermentada e mantida fechada. No segundo caso, a produção de biogás é mantida constante, ao mesmo tempo em que a biomassa é renovada no biodigestor e o biofertilizante mais antigo é retirado (FRANÇA JUNIOR, 2008).

Segundo Chernicharo (2001), os projetos hidráulicos dos biodigestores são de dois tipos: os biodigestores de batelada, com fluxo hidráulico descontínuo; e os de fluxo hidráulico contínuo, onde estão inseridos os reatores mais comuns no Brasil (modelos indiano, chinês, da marinha e UASB/RALF/RAFA).

O biodigestor de modelo UASB/RALF/RAFA (Figura 6), foco deste trabalho, é um tipo de reator que trata o efluente com base no processo de estabilização de matéria orgânica. É constituído por um tanque de fluxo vertical com câmaras de sedimentação e digestão anaeróbica, fechado na parte superior, não utilizando energia elétrica complementar. Segundo Aisse (2000), é importante que em reatores tipo UASB haja uma efetiva separação do biogás gerado, do esgoto e do lodo, além de que o lodo deve possuir boa capacidade de sedimentação e floculação (de 1 a 5 mm de diâmetro). A matéria orgânica contida no esgoto em fluxo ascendente é misturada ao lodo contido em um manto inoculado ou formado previamente.

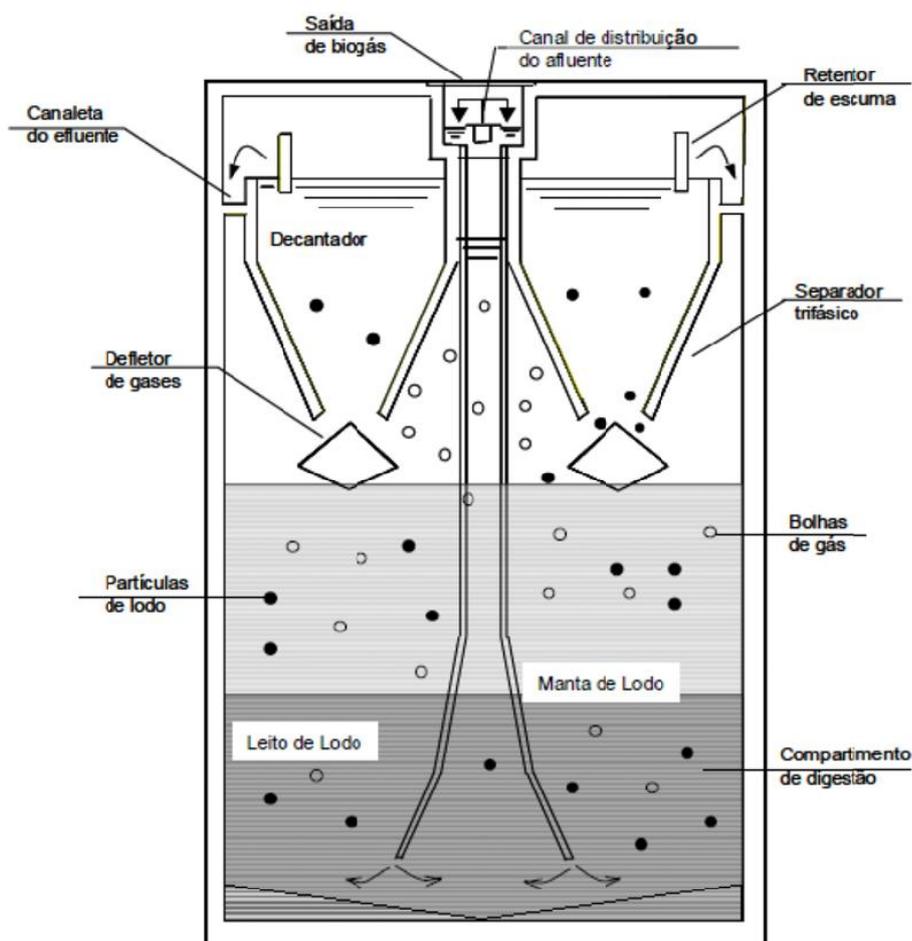


Figura 6 - Esquema de um reator UASB – Fonte: Versiani, 2005.

Os principais indicadores da matéria orgânica presente no esgoto são a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO). Conceitua-se DBO como o indicador da concentração da matéria orgânica biodegradável, pela demanda de oxigênio praticada por microrganismos. DQO é o indicador de matéria orgânica baseado na concentração de oxigênio consumido na oxidação da matéria orgânica, em meio ácido e um oxidante forte (VALENTE et. al., 1997).

A quantidade de DBO é diretamente proporcional à quantidade de esgoto que será tratada. Estima-se que seja gerado 0,054 kg de DBO para cada habitante em uma localidade urbana, considerando afluentes domésticos e industriais (PECORA, 2006).

O biogás gerado durante o processo de digestão anaeróbica nos reatores é frequentemente visto como um dejetto para ser tratado em uma Estação de Tratamento de Esgoto. A alta contribuição para o aquecimento global do metano, além de sua característica explosiva, representam riscos à Estação. Por estas razões o biogás é levado em tubulações apropriadas até uma área especial onde ocorrerá sua queima. Esta operação garante que durante a combustão do metano sua conversão em dióxido de carbono diminua o impacto ambiental associado a sua direta liberação para a atmosfera. O índice de poluição atmosférico é inferior ao do butano, presente no gás de cozinha (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006). A reação química da combustão do metano é mostrada na Figura 7.

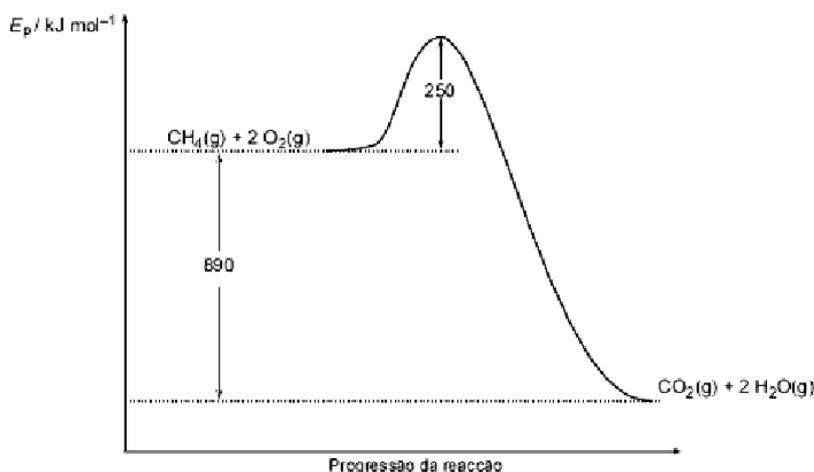


Figura 7 – Reação de combustão do metano tendo como produtos energia térmica e dióxido de carbono – Fonte: IAVE Web Site

O poder calorífico do biogás é diretamente proporcional à quantidade de metano existente na mistura gasosa, que é o único gás combustível presente. A parte não combustível, como o dióxido de carbono e a água reduzem o poder calorífico, prejudicando sua queima, assim diminuindo a eficiência. Para elevar a eficiência energética na conversão do biogás em energia elétrica ou outros fins, é necessário remover a umidade, o dióxido de carbono e o ácido sulfídrico. Este último é especialmente danoso para os equipamentos, pois causa corrosão precoce do motor e sistemas de transporte, especialmente naqueles construídos em ligas de alumínio, aços com níquel e no cobre (FRARE, 2006). A composição média do biogás, segundo o estudo publicado no Leitfaden Biogas (2013) é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do biogás

Componente	Concentração
Metano (CH ₄)	50% - 75% (vol.)
Dióxido de carbono (CO ₂)	25% - 45% (vol.)
Água (H ₂ O) - umidade	2% - 7% (vol.) (20 – 40°C)
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	20 – 20000 ppm
Nitrogênio (N ₂)	< 2% (vol.)
Oxigênio (O ₂)	< 2% (vol.)
Hidrogênio (H ₂)	< 1% (vol.)

Fonte: Leitfaden Biogas, 2013.

O potencial energético como combustível de 1,0 Nm³ de biogás, com concentração de 50% de CH₄ é equivalente a: 0,53 Nm³ de gás natural, 0,63 litro de óleo diesel e a 0,61 litro de gasolina. No entanto, há uma parte do biogás que atua contra a eficiência do seu aproveitamento. Além da degradação causada pelo gás sulfídrico, a siloxina impacta na vida útil dos equipamentos do gerador do biogás. A siloxina (Figura 8) é proveniente de produtos de higiene pessoal e cosméticos contendo sílica, provoca a formação de grãos de sílica, como a areia, comprometendo o funcionamento dos rotores de turbinas e motores causada pela propriedade abrasiva destes grãos. Para diminuir o teor destas impurezas deve-se empregar filtros e secadores apropriados.

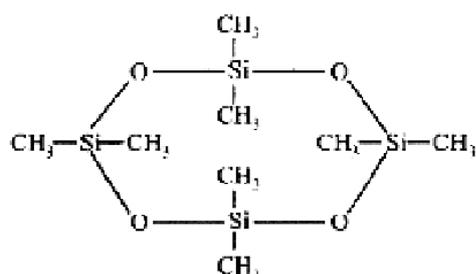


Figura 8 - Fórmula Estrutural da Siloxina - Fonte: Capstone, 2001.

2.4 Conversão energética do biogás

A conversão energética é o processo de transformação de um tipo de energia em outro. O biogás contém energia armazenada nas ligações moleculares do metano, que pode ser convertido em energia térmica ao passar pelo processo de combustão. Para transformar a energia térmica em mecânica, essa deve passar por um processo de combustão controlada, em uma turbina especialmente projetada para trabalhar idealmente com este combustível. A turbina a biogás pode ativar um gerador convertendo a energia mecânica em elétrica.

De acordo com França Junior (2008), para que a produção de energia elétrica a partir do biogás em uma ETE seja ininterrupta, o tamanho da estação deve atender a, no mínimo, uma população de 10.000 habitantes, com respectiva capacidade de geração de 5.544 kWh/mês.

O aproveitamento energético do biogás que seria meramente queimado para diminuir o potencial de efeito estufa traz benefícios indiretos para a sociedade, sob o ponto de vista energético. A geração descentralizada de energia, próxima ao ponto de consumo colabora na diminuição das perdas elétricas de distribuição, ao mesmo tempo em que aumenta a confiabilidade e a disponibilidade de energia elétrica. Também auxilia na diminuição da dependência de energia de fonte fóssil. Sob o ponto de vista econômico, há a redução dos gastos em compra de energia elétrica da distribuidora, aumentando a viabilidade econômica do tratamento de efluentes (PECORA, 2006).

Das tecnologias disponíveis, as turbinas a gás e motores de combustão baseados no ciclo Otto são os mais usuais. As turbinas a gás permitem maior eficiência global na conversão elétrica quando operadas em cogeração de calor e

eletricidade (COSTA et al., 2001). A Figura 9 ilustra uma turbina a gás, que é formada por três componentes básicos: o compressor de ar, câmara de combustão e a turbina propriamente dita. O funcionamento acontece da seguinte forma: com o giro do rotor, o ar é aspirado para dentro do compressor, elevando sua pressão, ao mesmo tempo em que é misturado ao combustível dentro da câmara de combustão. A mistura de gases é queimada em pressão constante, aumentando a temperatura dos gases. Desta forma é gerada a energia primária do sistema. Posteriormente, os gases produtos da combustão são expandidos na turbina, movimentando-a. Nesta etapa a energia térmica é convertida em mecânica, sendo que parte dela é utilizada para girar o compressor.

A turbina a gás possui menor tamanho do que turbinas a vapor, pois não utiliza um fluido intermediário para acionar o compressor. Uma vantagem adicional é a capacidade de operar com diferentes combustíveis, como gás natural, biogás (metano proveniente dele), querosene, gases do carvão e de biomassa. A turbina a gás segue o ciclo de Brayton, mostrado na Figura 10. O rendimento deste ciclo é de aproximadamente 35%.

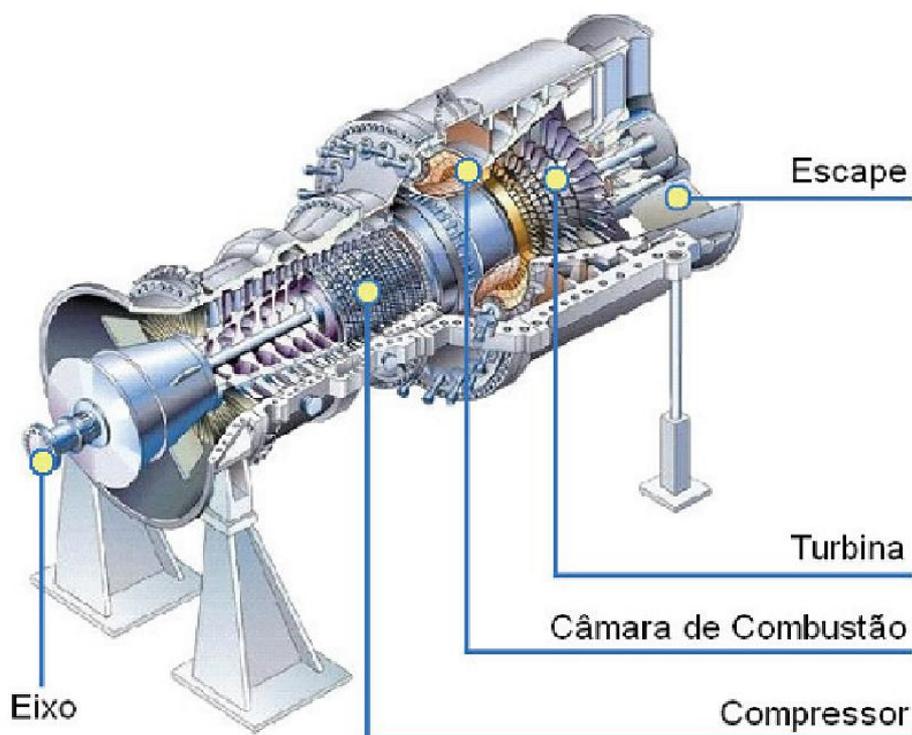


Figura 9 - Turbina a gás em corte - Fonte: França Junior, 2008.

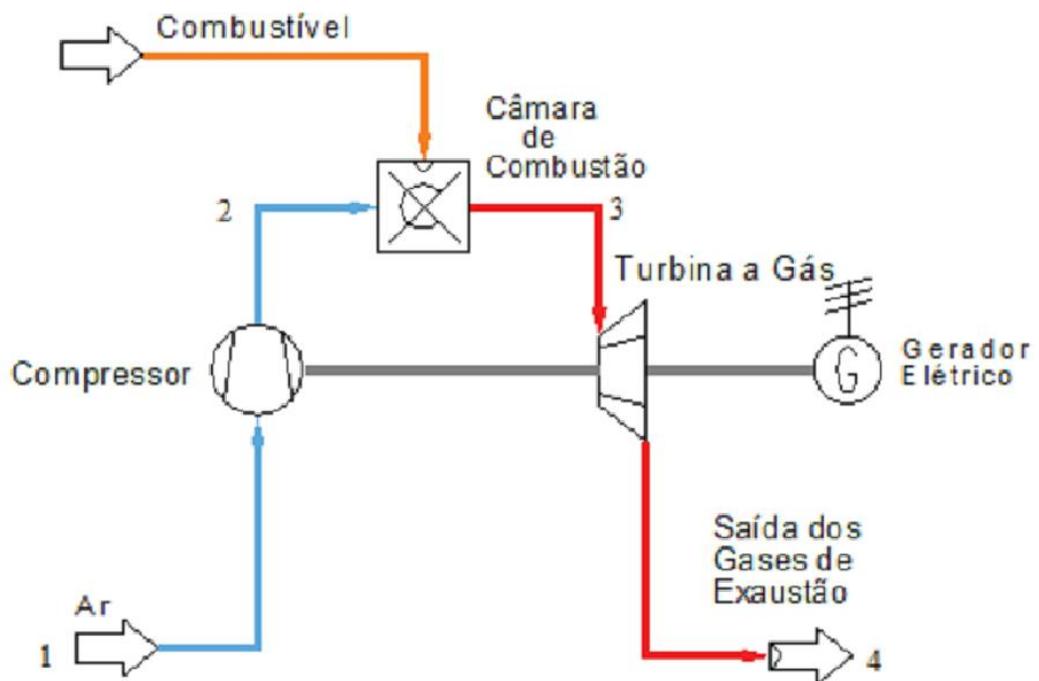


Figura 10 - Ciclo de Brayton (turbina a gás) - Fonte: França Junior, 2008.

Para o sistema composto por compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico, denomina-se “micro-turbina”, o conjunto com potência inferior a 250 kW e “mini-turbina”, a faixa de potências entre 250 kW a 1000 kW.

O sistema de turbina a vapor segundo o ciclo Rankine trabalham segundo a seguinte sequência: o fluido de trabalho é bombeado, aumentando sua pressão; Em uma caldeira, o fluido é aquecido à pressão constante até tornar-se vapor; O vapor entra em uma turbina para gerar movimentação do seu eixo, ao mesmo tempo que fornece energia para a bomba do fluido de trabalho; O vapor entra em um condensador, resfriando-se até voltar a ser líquido; o líquido volta para a bomba, em ciclo fechado.

Esta tecnologia oferece baixo rendimento na conversão calor para eletricidade. Possuem um alto custo e são mais poluentes. São viáveis nos casos de instalações grandes, em locais remotos e onde a disponibilidade de combustíveis representam baixo custo, como próximos a minas de carvão (SEMAE, 2011).

Os Motores de Combustão Interna (MCI) são dispositivos mais versáteis por aceitarem maior variedade de combustíveis que as turbinas a gás, pois convertem o combustível líquido ou gasoso acionando pistões confinados em cilindros, acoplados

a um eixo. Outra vantagem dos MCI é ser menos susceptível às impurezas do biogás, tais como umidade e gases não combustíveis. O ciclo Otto é o mais recomendável para a utilização de gases como combustível. Os motores de combustão interna são recomendáveis para gerações de energia onde a disponibilidade de combustível seja intermitente e as necessidades térmicas pouco significativas (FRANÇA JUNIOR, 2008).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Como objetivo geral deste trabalho tem-se a análise da viabilidade técnica e econômica da implantação de geração de energia elétrica por motor de combustão interna a partir do biogás da ETE Serraria, do DMAE de Porto Alegre.

3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que seguem são etapas intermediárias necessárias ao atingimento do objetivo geral deste trabalho, e estão listados abaixo:

- 1 - Estudar os blocos de equipamentos necessários para o processo de geração a biogás;
- 2 - Analisar a qualidade do biogás efluente, as concentrações de metano e demais características que possam influenciar no processo de geração;
- 3 - Identificar uma relação entre o esgoto afluente e o biogás efluente, estabelecendo índices de produtividade para a ETE Serraria;
- 4 – Premeditar a quantidade de energia elétrica gerada de acordo com as características do sistema proposto;
- 5 – Analisar a tarifação de energia elétrica praticada, para demanda e consumo, da ETE Serraria;
- 6 – Analisar os custos de implantação do sistema de geração a biogás proposto, bem como o retorno sobre o investimento (payback).

4 METODOLOGIA

O estudo de caso deste trabalho é focado nas características do esgoto encontrado na captação da ETE Serraria, localizada na zona sul do município de Porto Alegre – Rio Grande do Sul. A Figura 11 mostra uma visão geral da planta instalada, com indicações dos oito reatores UASBs. A Estação adota um sistema que combina etapas distintas de processo. O afluente passa primeiramente pelo tratamento preliminar, composto de peneiramento mecânico e caixa de areia aerada. Posteriormente, o esgoto é conduzido aos oito reatores anaeróbicos do tipo UASB. A seguir, o esgoto passa por um sistema de pós-tratamento por lodos ativados, com fases de nitrificação e desnitrificação, em oito conjuntos de equipamentos chamados Unitank (tecnologia da empresa Keppel Seghers). Há ainda um sistema de precipitação simultânea de fósforo nos tanques de lodos ativados e, por fim, há desidratação mecânica dos lodos gerados em centrífugas. A vantagem na utilização deste sistema se dá na reduzida área física de instalação e do consumo de energia elétrica necessária para aerar e movimentar o esgoto entre as fases do processo de descontaminação do esgoto.



Figura 11 - Visão panorâmica da ETE Serraria com destaque aos UASBs.

4.1 Dados de esgoto afluyente da ETE Serraria

A ETE Serraria foi dimensionada para realizar o tratamento em nível terciário dos efluentes sanitários coletados, incluindo a remoção dos nutrientes nitrogênio e fósforo. Os reatores UASB, objeto de estudo deste trabalho, está contido na fase secundária do tratamento. O projeto foi concebido para tratar esgotos com características domésticas. Os parâmetros apresentados na Tabela 2 foram adotados para o dimensionamento da unidade.

Tabela 2 – Concentração média mensal do esgoto afluyente.

Parâmetro	Valor
Vazão média (L/s)	2.710,000
Vazão máxima (L/s)	4.115,000
DQO (mg/L)	498,150
DBO5 (mg/L)	276,750
Sólidos suspensos totais (mg/L)	266,500
Nitrogênio total Kjeldahl (mg/L)	45,000
PT (mg/L)	7,00
pH	7,0 ~ 7,5
Coliforme fecal (NMP/100ml)	1,00E+07

Fonte: Manual de Operação ETE Serraria.

Atualmente, a ETE recebe uma vazão afluyente média de 1.000 L/s e será paulatinamente aumentado até a vazão máxima de projeto de 4.115 L/s. O início da operação ocorreu em Março de 2014, com vazão inferior a 500 L/s.

4.2 Dados de biogás da ETE Serraria

O reator utilizado neste estudo de caso é do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). O controle operacional dos reatores UASB são efetuados basicamente em função da avaliação de 3 parâmetros principais:

a) A eficiência de remoção de matéria orgânica deve estar na faixa de 60% a 70%;

b) A produção de Biogás é o melhor indicador da degradação da matéria orgânica no reator. Teoricamente 1,0 kg de DQO consumida deve produzir 0,35 Nm³ de metano; No entanto, deve ser levado em consideração a possibilidade de até 40% do biogás permanecer dissolvido na massa líquida;

c) O pH do reator deve apresentar um pH entre 6,5 e 7,5 na fase metanogênica. Se o pH ficar abaixo desta faixa significa que o reator está na fase acidogênica, concentração ácidos voláteis acima de 500 mg ácido acético/L, geralmente em função de um desequilíbrio entre a carga aplicada e a biomassa no reator. Neste caso é aconselhável reduzir a carga orgânica e não descartar lodo até o pH se recuperar. Em casos extremos é possível controlar o pH com a aplicação de produtos químicos alcalinos.

Cada reator é atendido por uma linha de coleta de biogás interligada aos dois conjuntos queimadores da ETE, cada um com a capacidade para 550 Nm³/hora. A composição média esperada para o biogás é 65% metano e 35% dióxido de carbono a 37°C.

Até a data de realização deste trabalho não havia produção de biogás na ETE Serraria. Por esta razão, todos os materiais e métodos levantados para este estudo de caso são aqueles considerados em projetos, com dados das características de esgoto e dimensionamento dos equipamentos e sistemas de tratamento.

4.3 Equipamentos propostos para utilização

Os sistemas de geração de energia elétrica, de acordo com a revisão bibliográfica levantada, em termos tecnológicos, poderiam ser de três tipos: turbina a gás; motores de combustão interna de ciclo Otto; turbina a vapor segundo o ciclo Rankine. Os custos de operação, manutenção e aquisição das turbinas a gás não são aplicáveis ao estudo, pois são altamente proibitivos. Comparando-se os rendimentos dos motores de ciclo Otto com turbina a gás de ciclo Rankine, encontra-se no estudo de SEMAE (2011), maior viabilidade para o uso de biogás como combustível em motor de combustão interna segundo ciclo Otto. Acumulando-se os rendimentos de conversão de energia química para térmica e de conversão de energia térmica para elétrica, o MCI de ciclo Otto obtém 20% de vantagem sobre a turbina a vapor de ciclo Rankine. O modelo estudado para geração de energia elétrica na ETE Rio Preto – São Paulo, é proporcional ao dimensionamento da levantado para a ETE Serraria – Porto Alegre, dada a atual fase de tratamento de esgoto e vazão afluyente, e previsão de acréscimo nesses valores para os próximos meses. Há a possibilidade de aumentar este sistema, expandindo-se para até o

valor de vazão máxima esperado, duplicando este sistema modular.

Para a instalação do sistema de geração de energia elétrica com base no motor de combustão interna de ciclo Otto, são necessários os seguintes componentes (SEMAE, 2011):

- a) Grupo gerador de motor ciclo Otto, combustível biogás;
- b) Gasômetro adequado à vazão de biogás esperada;
- c) Interligação do sistema de geração com o sistema de queimadores, previamente instalados;
- d) sistema de filtragem do biogás, interligado aos queimadores e saída dos UASBs;
- e) sistema de compressão do biogás;
- f) instalações hidromecânicas e elétricas do sistema;
- g) sistema de automação e controle da geração elétrica em paralelismo com a rede;
- h) fornecimento e instalação do sistema elétrico em 440V e 13.8 kV, incluindo transformador elevador, cabeamento adequado entre o gerador a biogás, transformador, cabine de entrada, tubulações, quadro de comando e controle, sistema de paralelismo com a rede elétrica de distribuição, licenciamento junto à ANEEL e demais serviços referentes de geração de energia elétrica.
- i) obras civis correspondentes;

Os orçamentos de custos levantados são demonstrados na Tabela 3, utilizando-se do sistema proposto em SEMAE (2011). A relação de custos foi atualizada pelo índice IPCA para Dezembro de 2014, a fim de confrontar custos de instalações e aquisições com valores de energia elétrica sob a mesma referência. Os valores foram inflacionados sob os seguintes índices: 5,8386, para 2012; 5,9108, para 2013 e 6,4076, para 2014.

Tabela 3 - Orçamento de equipamentos para geração de energia elétrica a biogás

Descrição	Custo
Grupo gerador de 788 kW (764 kWe)	R\$ 1.634.031,53
Gasômetro e obra civil	R\$ 1.003.270,50
Sist. de coleta de biogás	R\$ 383.733,44
Filtragem do biogás	R\$ 107.323,13
Sistema de compressão	R\$ 121.809,33
Controle de paralelismo	R\$ 473.404,75
Obras civis complementares	R\$ 322.194,82
Instalações hidromecânicas e elétricas	R\$ 390.207,80
TOTAL	R\$ 4.437.989,28

4.4 Capacidade de geração de energia elétrica a partir do biogás

Para a transformação da energia química contida no biogás para energia elétrica utilizou-se a equivalência através do poder calorífico inferior do biogás. A Equação 1 realiza a equivalência do potencial calorífico inferior da unidade kcal/kg para potencial calorífico em kWh/m³ de biogás.

$$PCI_D = PE \times PCI \times K \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

PCI_D = Potencial calorífico inferior em kWh/m³;

PE = Peso Específico em kg/Nm³;

PCI = Potencial calorífico inferior em kcal/kg;

K = 4,19 kWh/3600 (constante de conversão kcal para kJ para kWh).

Como valor de referência para a eficiência global da máquina térmica utilizada com grupos geradores, segundo o ciclo Otto, é utilizado 25%, conforme CCE (2000) apud Souza, et al. (2004), representado pelo fator 0,25 na Equação 2. A Equação 2 determina a potência elétrica a ser disponibilizada.

$$P = PTB \times PCI_D \times 0,25 \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

P = Potência Elétrica Disponibilizada em kW;

PTB = Produção total de biogás em m³/h;

Onde,

$$PTB = DQO \times Q \times PT_{UASB} \times CH_{4gasoso} \quad \text{Equação 3}$$

PT_{UASB} = percentual de tratamento no UASB

$CH_{4gasoso}$ = percentual de metano aproveitável em gás

Q = vazão por hora em m^3/h

A Equação 4 demonstra a energia elétrica a ser disponibilizada mensalmente:

$$E_{mês} = P \times h \times m \quad \text{Equação 4}$$

Onde,

$E_{mês}$ = Energia elétrica em kWh/mês;

h = 24 horas, por dia;

m = 30,4167 dias do mês, considerando 365 dias por ano / 12 meses.

Para dados de projeto da ETE Serraria, a composição química do biogás é de 65% de metano para 35% de dióxido de carbono. O respectivo peso específico, em kg/Nm^3 é de 1,1518 e o PCI, em kcal/kg é de 4.831,14. (AVELLAR, 2001 apud IANNICELLI, 2008).

Conforme a Resolução 414/2014 da ANEEL, as unidades consumidoras que possuem demanda contratada acima de 300 kW, é compulsória a aplicação da modalidade tarifária horo-sazonal. Desta forma, o preço pago pela energia da distribuidora varia conforme a hora e o período do ano. O horário denominado ponta caracteriza-se por ser o período de três horas, normalmente das 18 horas às 21 horas, deslocado em uma hora durante o horário de verão. É neste horário que se dá o pico de consumo de energia na cidade de Porto Alegre/RS e também na própria ETE, pois aumenta também o consumo de água no período, conseqüentemente a vazão de entrada cresce na mesma proporção. O custo da energia é 4,52 vezes maior durante o horário ponta do que no horário fora ponta.

O consumo de energia elétrica da ETE Serraria no mês de referência para este estudo (Dezembro/2014) é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Consumo de energia elétrica em Dezembro de 2014.

Demanda (kW)		Consumo (kWh)		TOTAL (R\$)
Ponta 603	Fora ponta 618	Ponta 32.538	Fora ponta 344.160	
R\$ 0,00	R\$ 12937,16	R\$ 31.795,01	R\$ 74.292,86	R\$ 119.025,03

Fonte: DMAE

A tendência de consumo é crescente, pois a vazão de esgoto tratado foi de aproximadamente 1000 L/s em Dezembro de 2014 e será proporcionalmente maior à medida que a vazão se aproxima do valor máximo de projeto. A ETE encontra-se em fase de “startup” (partida) e comissionamento de seus reatores. Por esta razão, não se faz necessário o levantamento de dados de consumo de meses recorrentes, pois o mês de estudo é o de maior demanda e consumo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do potencial do biogás da ETE Serraria para conversão em energia elétrica

Aplicando-se a Equação 1 sobre os dados de biogás, que são de concentração de 65% de Metano e 35% de dióxido de carbono, obtemos o valor de PCI_D , em kWh/m³.

A Produção total de biogás depende do percentual de DQO tratado nos reatores UASB, que neste caso é de 65%, além do desconto de 40% de biogás que está retido no lodo, e por isso levamos 60% de biogás efetivamente ao MCI de biogás. Cada kg de DQO gera 0,35 Nm³ de metano. A vazão média para o mês de referência do estudo (Dezembro de 2014) foi de 1000 L/s. A DQO de entrada no UASB é de 498,150 mg/l, que levando em conta a vazão média por hora, obtem-se o valor de DQO em kg/h. Aplicando-se a Equação 3, obtemos o valor de PTB, em Nm³/h. Os resultados da Equação 1 e da Equação 3 são fatores para encontrar o valor da potência e energia gerada pelo motor a biogás, na Equação 2. A energia elétrica mensal disponível para consumo, considerando uma operação estável e

ininterrupta da geração a biogás é encontrada na Equação 4. Os resultados dos cálculos são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados encontrados.

Grandeza	Valor
PCI _D	6,476 kWh/m ³
DQO	1793,34 kg/h.
PTB	244,79091 Nm ³ /h
P	396,32 kW
E _{mês}	289.311,349 kWh/mês

5.2 Análise de viabilidade financeira e econômica

Tomando os dados de energia elétrica consumida na ETE Serraria, temos que nas três horas ponta o custo de consumo é de R\$ 0,977 por kWh e no período fora ponta é de R\$ 0,216 por kWh. O consumo global de energia elétrica foi de 376.698 kWh/mês. A projeção de disponibilidade de energia elétrica produzida pela instalação a biogás é de 289.311 kWh/mês. Esta quantidade é capaz de suprir cerca de 76,80% da energia elétrica consumida na ETE.

Decorrente do custo da energia elétrica da rede ser superior na hora ponta, pode-se inferir que a melhor utilização econômica para o biogás na geração de energia elétrica é o suprimento na totalidade durante a hora ponta, e o restante atende o consumo em horário fora ponta. Isso significa que pode-se utilizar 32.538 kWh durante as horas ponta e 256.773 kWh no período fora ponta.

Com base nesta análise pode-se calcular o custo de energia elétrica evitado com a utilização do sistema proposto. Durante a ponta, evita-se o custo de R\$ 31.795,01 e no período fora ponta de R\$ 55.428,87, que somam R\$ 87.223,88 por mês.

O sistema proposto conta com a estimativa de custos de operação e manutenção (insumos e mão-de-obra) de R\$ 95.207,65 anuais, além de uma revisão geral do sistema a cada cinco anos, com custo de R\$ 238.019,11 (valores inflacionados, encontrados em SEMAE, 2011). Este valor corresponde a R\$ 333.226,76 em cinco anos ou R\$ 5.553,78 mensais.

Para realizar a análise de payback simples, a qual desconsidera o desconto

ou recuperação de juros no tempo, efetuou-se o seguinte cálculo, com dados do sistema proposto e do custo de energia evitado, apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Payback simples.

Variável	Valor
CF _t = fluxo de caixa	R\$ (87223,88 – 5553,78) /mês
Investimento inicial	R\$ 4.437.989,28
Payback simples	54,34 ~ 55 meses

Porém, é importante verificar-se também a comprovação do retorno sobre o investimento confrontando-se com uma alternativa de investimento no mercado. Há que levar-se em conta a origem do financiamento do valor de investimento inicial.

Considerando uma taxa de juros de 9 por cento ao ano ou 0,75% ao mês, ao longo de 55 meses (4 anos e sete meses), conseguida no mercado de investimentos, o valor correspondente ao sistema de biogás cresce de R\$ 4.437.989,28 para R\$6.693.669,47.

6 CONCLUSÕES

O estudo de caso permitiu avaliar a viabilidade técnica e econômica para a implantação de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nos reatores anaeróbicos da ETE Serraria.

A análise do afluente de esgoto captado para a ETE Serraria possui composição média de 65% de metano, sendo 60% livres para queima, que geram condições de geração elétrica a partir da conversão de energia mecânica, por meio de máquinas térmicas. Verificou-se que a tecnologia mais viável foi a de motor de combustão de ciclo Otto. Levantou-se a estrutura de equipamentos necessários e respectivas obras. O valor de investimento para a instalação foi de R\$ 4.437.989,28, e o valor em gastos de manutenção e operação foi de R\$ 333.226,76, para cinco anos.

A vazão afluente da ETE Serraria ainda não estabilizou-se na sua capacidade de plena carga, pois ainda passa pelo processo de *start-up* dos seus

reatores. Espera-se que atinja a vazão de 4.115 L/s em dois anos de operação. A viabilidade do sistema proposto deve aumentar, à medida que a vazão aproxima-se da máxima de projeto, pois os custos de manutenção e operação permanecem os mesmos, e o retorno sobre a compra de energia elétrica da rede aumenta.

A tarifa de energia elétrica avaliada foi de Dezembro de 2014. Projeta-se que o custo de energia da rede poderá sofrer incrementos, devido a diminuição na produção hidroelétrica (mais barata) e necessidade de geração termoelétrica (mais cara), para compensar. Devido a esta condição, a geração própria de energia elétrica torna-se mais viável a medida que encarece a energia da rede.

A partir da análise de payback simples pode-se concluir que o retorno sobre o investimento ocorre em no máximo 55 meses ou 4 anos e 7 meses. Considerando juros encontrados no mercado de 9% ao ano o retorno sobre o capital acontece no mesmo tempo.

Contudo, são esperadas grandes variações na produção de biogás conforme as estações do ano e devido ao despejo de altas cargas de água da chuva. Estes fatores influenciam na produção e conversão do biogás para menos. O despejo de água da rede pluvial em esgoto é irregular, porém uma realidade considerando o município de Porto Alegre, que tenta diminuir as ligações clandestinas da rede através de campanhas de conscientização.

A relação de esgoto afluente para biogás efluente é de 1 L para $6,8 \times 10^{-5}$ Nm³ de biogás. Com a vazão de estudo de caso de 1000 L/s, é possível gerar 289.311,349 kWh/mês.

7 REFERÊNCIAS

AISSE, M.M. **Sistemas econômicos de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABRES, 2000. 192 p.

ALVES, I. R. de F. S., **Análise Experimental Do Potencial De Geração De Biogás Em Resíduos Sólidos Urbanos**. Recife, 2008. 118 f.

BITTON, GABRIEL. **Wastewater microbiology**. New York: Ed. Wiley-Liss, 2005.

349 p.

CAPSTONE. **Authorized Service Provider Training Manual**. Capstone Turbine Corporation, Los Angeles, 2001.

CENBIO. **Relatório Técnico Final** – Projeto ENER-G-BIOG, São Paulo, 2004.

CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador). **Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Projeto PROSAB, 2001. 544p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007. 379p.

COLDEBELLA, Anderson, **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. UNIOESTE, Paraná, 2006. 75p.

COSTA et al. **Produção de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos**. Trabalho de Graduação Interdisciplinar/FAAP, São Paulo, 2001.

DMAE - DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO. **Relatório de Consumo de Energia Elétrica**. Porto Alegre, 2014.

ED DLUGOKENCKY e TANS, P. NOAA/ESRL. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. Global Greenhouse Gas Reference Network, 2015. Disponível em: <www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. Acesso em: 28 jan. 2015.

ENERGY ACADEMY, **BP Statistical Review of World Energy June 2014**. Heriot-Watt University, 2014. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy2014-full-report.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2015.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. **Leitfaden Biogas Von der Gewinnung zur Nutzung**. Gülzow - Prüzen, 2013. Disponível em: <<http://biogas.fnr.de>>. Acesso em: 27 jan. 2015.

FRANÇA JUNIOR, A. T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008. 148p.

FRARE, L. M. **Estudos para a implementação de uma planta para remoção de ácido sulfídrico de processos de produção de biogás**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006. 182p.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento**. Ministério da Saúde. Brasília, 2004. 408p.

IANNICELLI, André Luiz. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UNITAU, Taubaté, 2008. Cap. 9.

IAVE WEBSITE. **Reação de Combustão do Metano**. Disponível em: <<http://bi.gave.min-edu.pt/bi/es/968/4029>> Acesso em 17 fev. 2015

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. **United Nations Environment Programme**. Assessment report 4; Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: The workbook. Geneva: IPCC, 1996.

LE MOS, H. M. **Comércio e Meio Ambiente, Tecnologias Ambientais e Comércio Internacional**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2001.

MOREIRA, L. **Cooperação: O caminho para o acesso universal ao saneamento**. 5º Encontro Nacional das Águas. Apresentação, 2014.

OLIVEIRA, Paulo Armando Victória de; HIGARASHI, Martha Mayumi. **Geração e utilização de biogás em unidades de Produção de suínos**. Concórdia - SC, Embrapa suínos e aves, 2006. 42 p.

PECORA, Vanessa. **Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. 2006. 153 f.

PEREIRA, R. S. **Poluição hídrica causas e conseqüências**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas UFRGS, 2004. 19 p.

PEROVANO, T. G. e FORMIGONI, L. P. A. **Geração de Energia a Partir de Subprodutos do Tratamento de Esgotos Sanitários**. Monografia (Graduação – Departamento de Engenharia Ambiental). UFES, 2011. 101 p.

SERVIÇO MUNICIPAL AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO - SEMAE. **Estudo Técnico de Viabilidade – Cogeração de Energia A Partir de Biogás e do Lodo Proveniente de Reatores Anaeróbios da ETE Rio Preto**. São José do Rio Preto:

São Paulo, 2011. 42 p.

SOUZA, Samuel Nelson Melegari de et al. **Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura**. Acta Scientiarum: Technology, Maringá, v. 26, n. 2, p.127-133, 22 dez. 2004. Trimestral.

VALENTE, José Pedro Serra; PADILHA, Pedro Magalhães; SILVA, Assunta Maria Marques. **Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP**. Eclét. Quím., São Paulo, v. 22, 1997. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46701997000100005&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 28 jan. 2015.

VAN HAANDEL, A. C.& LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente**. Epgraf, Campina Grande, 1994. 240 p.

VERSIANI, B.M. **Desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos sanitários do campus da UFRJ**. Dissertação (mestrado – PPGE da UFRJ). Rio de Janeiro, RJ, 2005. 88f.

ROVEIRA & PEREIRA. **Comércio e meio Ambiente**. Fundação Getúlio Vargas. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2001.

WMO, The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2013. **WMO Greenhouse Gas Bulletin**. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/documents/1002_GHG_Bulletin.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2015.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) – UNIOESTE, 2012. 52 p.